

620.179.16(043)

С30

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

**Семеген Михайло Михайлович**



УДК 622.691.4.002.5

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ  
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕМОУНТИХ ДЛІАНОК  
МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОУПРОВОДІВ**

05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ - 2010



Дисертацією є рукопис  
Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, професор  
**Лютак Зіновій Петрович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Заміховський Леонід Михайлович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматизації

кандидат технічних наук



Захи  
спеціалізов  
національн  
Івано-Фран

чальника  
йнівного

асіданні  
вському  
6019, м.

З ди  
національн  
Франківськ

івського  
Івано-

Автограф

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, кандидат технічних наук, професор

Дранчук М.М.



an2097

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Нафтогазотранспортна система України є важливою складовою частиною соціально-економічного розвитку в державі. Забезпечення безаварійної експлуатації основної ланки нафтогазотранспортної системи – магістральних трубопроводів є важливим науковим та технічним завданням. Завдання відноситься до визначення та оцінки небезпечних експлуатаційних ділянок трубопроводів, які потребують ремонту, зокрема підземної їх частини. Основним параметром, що визначає експлуатаційні характеристики ремонтної ділянки трубопроводу є величина напружень у стінці його труб, які залежать від ряду чинників, наприклад, товщини стінки, величини зусиль тощо. Ділянки трубопроводів, які потребують ремонту знаходяться в складному напруженому стані, піддаючись дії навантажень, які не завжди можна врахувати при проектуванні, так як вони проявляються в експлуатаційних умовах через зсуви ґрунту, розмиву схилу гір та пагорбів, корозію його стінок, зсувах бетонних опор під трубопроводами на річкових переходах тощо, а також при дії різних їх комбінацій. Результати аналізу відмов свідчать про те, що однією з основних причин пошкодження підземних трубопроводів є дія зовнішніх зусиль, яка приводить до зміни їх напружено-деформованого стану, утворення тріщин, розривів по зварних з'єднаннях і по тілу труби. Тому, важливим є визначення виду зусиль, напрямку та місць їх дії, які створюють напружено-деформований стан трубопроводу на ремонтній ділянці. При звільненні від ґрунту ремонтної ділянки підземного трубопроводу порушують його рівновагу. При цьому визначення виду зусиль та величини напружень в її критичних перерізах дасть можливість оптимізувати проведення ремонтно-відновлюваних робіт та мінімізувати вплив даних зусиль, забезпечивши цілісність конструкції трубопроводу, що зумовить безпечне проведення даних робіт.

Виявляти дію навантажень, які не враховані при проектуванні, можна в період експлуатації трубопроводів шляхом контролю їх напружено-деформованого стану. Аналіз розрахунків показує, що випучування або просідання окремих ділянок трубопроводу приводить до появи недопустимих напружень у стінках металу труб. При великих просіданнях трубопроводів в їх стінках можуть виникати пластичні деформації, що не допустимо для подальшої експлуатації. Тому оцінка напружено-деформованого стану та визначення найбільш навантажених ділянок трубопроводів з врахуванням діючих зусиль, є важливим напрямком досліджень у визначенні умов безпечного проведення ремонтно-відновлюваних робіт на них. Визначення напружень та векторів зусиль вирішує не тільки проблему оцінки дійсного напруженого стану трубопроводу, але і причини їх виникнення, що важливо для прийняття подальших правильних рішень у проведенні ремонтних робіт і забезпечення їх подальшої експлуатації. Отже, завдання розробки нових



методів і засобів для визначення напружено-деформованого стану трубопроводів при їх ремонті є актуальним та своєчасним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за планами науково-дослідної теми № 286/05 згідно договору з Управлінням магістральних газопроводів “Черкаситрансгаз” “Контроль напружено-деформованого стану об'єкту технологічних трубопроводів компресорних станцій КС 37Б “Тальне”, “Кременчук” номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0104U0050000, та наукової тематики № 267/05 “Контроль напружено-деформованого стану магістральних газопроводів на підприємствах “Укртрансгаз”, номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0105U004995. Автор брав участь у виконанні даних тем, як відповідальний виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є обґрунтування та удосконалення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів на ремонтних ділянках в експлуатаційних умовах.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз методів і засобів контролю напружено-деформованого стану трубопроводів, проаналізувати фактори впливу і навантаження, які впливають на зміну напружено-деформованого стану трубопроводу в експлуатаційних умовах;
- розробити математичну модель визначення напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу ультразвуковим методом, яка дозволить підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках на основі явища акустопружності в трьох взаємноперпендикулярних напрямках;
- удосконалити ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, який дасть можливість визначити вид, місце та напрям дії зусилля, що діє на ремонтній ділянці;
- удосконалити модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога;
- удосконалити пристрій для ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу та розробити проект методики проведення контролю, провести метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу та пристрою;
- провести лабораторні та натурні дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтній ділянці з допомогою розроблених методу та пристрою.

**Об'єкт дослідження.** Процес ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

**Предмет дослідження.** Метод та засіб ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

**Методи дослідження.** Методи дослідження, що покладені в основу роботи, базуються на використанні методів математичного моделювання; числових методів розрахунку напружень; теорії похибок вимірювань і контролю, регресійного та кореляційного аналізів, які використовувались для дослідження похибок визначення величини напружень за одержаною математичною моделлю, а також на класичних виведеннях теорії пружності, акустики і статистичних методів обробки результатів досліджень. Теоретичні висновки базуються на математичних залежностях та підтверджуються результатами, які отримані в лабораторних та експлуатаційних умовах.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше розроблена математична модель визначення напружено-деформованого стану магістрального трубопроводу, що дозволяє підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках, яка полягає в тому, що за явищем акустопружності розраховується сумарне напруження в околі однієї точки стінки труби від зміни швидкості трьох ультразвукових хвиль, що поширюються у взаємноперпендикулярних напрямках;

- дістав подальший розвиток ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів, що дає можливість визначати вид, місце та напрям дії зусилля, яке діє на ділянку трубопроводу як по околу труби так і вздовж її вісі та полягає у визначенні максимального значення еквівалентного напруження за результатами дискретного контролю;

- вдосконалена модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога, яка відрізняється від відомих введенням додаткових коливальних контурів і полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Були отримані наступні результати:

- представлено алгоритм визначення залежності зміни швидкості поширення ультразвукових поздовжніх хвиль у стінці трубопроводу в трьох взаємноперпендикулярних напрямках від величини напружено-деформованого стану, що дає можливість використати результати обчислення розробленої математичної моделі безпосередньо при виконанні ремонтних робіт;

- на основі розробленого методу, а також експериментальних досліджень, які полягають у визначенні напружено-деформованого стану в стінках трубопроводу в трьох взаємноперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками його головних осей удосконалений ультразвуковий пристрій для вимірювання швидкості поширення ультразвуку, на що отримано патент України на корисну модель;

- проведено метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу, пристрою контролю та розроблено методику її визначення;

розроблено проект методики проведення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів в експлуатаційних умовах, яка дає можливість визначати вид, напрям та місце дії зусилля;

- одержані результати оцінки напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів впроваджено в Управлінні магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз»;

- теоретичні та практичні результати роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці студентів спеціальності 7.090903 – «Прилади та системи неруйнівного контролю» з дисципліни «Акустичний контроль».

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автором проведений теоретичний аналіз методів і засобів неруйнівного контролю технічного стану магістральних трубопроводів, проаналізовані деструктивні фактори, які впливають на зміну фізико-механічних характеристик металу стінок трубопроводів в експлуатаційних умовах. Досліджені інформативні параметри, які визначають зміну фізико-механічних характеристик металу трубопроводу, запропонований метод контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів на ремонтних ділянках [1].

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: обґрунтування та розроблення підходу до визначення величини напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів [3, 10, 12,]; визначення напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтних ділянках [2, 11]; визначення міри прогинів трубопроводу на ремонтних ділянках, розроблення функціональної схеми ультразвукового пристрою для визначення швидкості поширення ультразвуку [4]; отримання аналітичної залежності, яка пов'язує величину напружень в середовищі поширення ультразвукових поздовжніх хвиль із зміною величини їх швидкості; удосконалення методу, який полягає в визначенні напружень у трьох взаємноперпендикулярних напрямках, які співпадають з напрямками осей симетрії ремонтної ділянки трубопроводу за допомогою системи первинних п'єзоелектричних перетворювачів, проведення лабораторних досліджень [5, 8]; експериментальні дослідження та аналіз впливу нерівностей на границі розділу поверхні п'єзоперетворювача та

трубопроводу, які впливають на точність та чутливість проведення контролю акустичним методом [6]; представлено спосіб підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвуку [9]; обґрунтування та розробка методу визначення напружень у стінках трубопроводу та розробка конструкції ультразвукового первинного перетворювача для генерування та приймання поздовжніх ультразвукових хвиль [13, 14]; вдосконалення моделі електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача, яка полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів [7].

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та експериментальні результати обговорювались на науково-технічних конференціях: всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (м. Івано-Франківськ, 2005 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці «ІФНТУНГ – 40» (м. Івано-Франківськ, 2007 р.); VI науково-технічній конференції «Інструментобудування 2007: стан і перспективи» (м. Київ, 2007 р.); V міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 2008 р.); VI національній науково-технічній конференції і виставці «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (м. Київ, 2009 р.); на наукових семінарах кафедри МПКЯ і СП ІФНТУНГ (2004 – 2009 рр.).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 14 наукових праць, з них 8 статей у фахових виданнях (1 стаття одноособова), рекомендованих ВАК України та 5 тез доповідей в матеріалах науково-технічних конференцій, одному патенті України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст дисертації викладено на 152 сторінках, робота містить 5 таблиць, 60 рисунків, список використаних джерел, що налічує 94 найменування та 15 додатків, які займають 38 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність роботи, сформульовано мету та визначено завдання досліджень, наведено дані про зв'язок дисертації з науковими програмами та планами, визначено об'єкт та предмет дослідження, висвітлено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів і особистий внесок здобувача, подано відомості про їх апробацію та впровадження.

У першому розділі поданий аналіз факторів, які спричинюють виникнення небезпечних ділянок магістральних трубопроводів, які потребують ремонту. Також розділ охоплює питання, щодо характеристики умов роботи, та аналіз впливу навантажень, які діють на магістральний трубопровід та формують його напружено-деформований стан.

Здійснений аналіз сучасного стану та тенденції розвитку неруйнівних методів та засобів контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів, зокрема значну увагу приділено аналізу існуючим ультразвуковим методам. Розглянута можливість застосування ультразвукових методів та засобів для контролю механічних характеристик металу труб в загальній проблемі забезпечення безпечної експлуатації магістральних трубопроводів. Доказано, що найбільш оптимальними є луно-імпульсний метод, який можна використовувати для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів в експлуатаційних умовах. Показана необхідність розробки нових методів та засобів контролю напружено-деформованого стану трубопроводів та застосування їх для дослідження небезпечних ділянок магістральних трубопроводів. На підставі викладеного сформовані основні завдання і обґрунтовано напрям дисертаційних досліджень.

У другому розділі запропоновано теоретико-експериментальні передумови розробки методу контролю напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів на ремонтних ділянках. Вибрані та обґрунтовані нові рішення для реалізації засобів контролю напружено-деформованого стану металу трубопроводів ультразвуковим методом.

Обґрунтовано вибір типу пружних хвиль та встановлено, що швидкість поширення поздовжніх ультразвукових хвиль в меншій мірі змінюється в залежності від зміни текстури сталі ніж в поперечних. В результаті проведеного аналізу фізико-механічних параметрів металу магістральних трубопроводів встановлено, що причиною зміни текстури матеріалу труб однієї марки сталі є відмінності у методах їх виготовлення на різних підприємствах. Зроблено висновок, що найбільш прийнятним є застосування ультразвукових поздовжніх хвиль для контролю величини напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів в натурних умовах.

Досліджено поширення ультразвукової хвилі в деформованому середовищі у порівнянні із недеформованим використавши підхід Лагранжа.

В результаті вибраного підходу використано відоме рівняння акустопружного ефекту у тензорній формі:

$$[K_{ijkl}n_i n_l + (\sigma_{ij} n_i n_l - \rho v^2) \delta_{ij}] U_j = 0, \quad (1)$$

де  $i, j, k, l$  – індекси, що позначають напрямок тензора коефіцієнтів пружної деформації по осях Декартових координат  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ ;  $K_{ijkl}$  – тензор коефіцієнтів пружної деформації четвертого порядку,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.



$n_i$  – вектор напрямку поширення ультразвукової хвилі,  $n_i$  – вектор поляризації коливань ультразвукової хвилі,  $U_i$  – ультразвукове гармонійне коливання.

Для розв'язку (1) вибрано напрям поширення пружної ультразвукової хвилі, який співпадає з віссю  $x_3$  пружного середовища, при умові існування плоского напруженого стану в площині  $x_1x_2$ . Вибрані ультразвукові поздовжні коливання. Це дозволило спростити (1) до розгляду одного компонента тензора коефіцієнтів пружної деформації четвертого порядку  $\bar{K}_{ijkl}$  та одного компонента тензора напружень  $\sigma_{ij}$ . Рівняння (1) допускає не тривіальний розв'язок для власних векторів  $U_i$  тільки тоді, коли вираз в квадратних дужках (1) перетворюється в нуль. Прирівнявши до нуля вираз в квадратних дужках (1) та провівши ряд математичних перетворень отримано рівняння акустопружності для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу наступного виду:

$$\left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp ij} = A_i \sigma_{ii} + A_j \sigma_{jj}, \quad (2)$$

де  $\Delta v_{\text{вим}}$  – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі;  $v_0$  – швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі;  $A_i, A_j$  – акустопружні коефіцієнти, які визначаються експериментально для конкретної марки сталі в лабораторних умовах;  $i, j = 1, 2, 3$  – індекси координатних осей, які співпадають з напрямками головних осей симетрії трубопроводу  $X, Y, Z$ .

Рівняння (2) застосовано до визначення напружено-деформованого стану при одноосному напруженому стані. Для обчислення напружено-деформованого стану в стінці трубопроводу розглянуто трьохосний напружений стан. Враховано, що осі Декартової системи координат співпадають з головними осями симетрії трубопроводу (рис. 1). Використовуючи методи тензорного числення, отримано аналітичну залежність, яка пов'язує величину напружень в середовищі поширення ультразвукових поздовжніх хвиль в трьох напрямках із зміною величини їх швидкості:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp xz} &= A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}, \\ \left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp yx} &= 1.4142 (A_{x1} \sigma_{xx} + A_{z1} \sigma_{zz}), \\ \left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp yz} &= 1.4142 (A_{y2} \sigma_{yy} + A_{z2} \sigma_{zz}) \end{aligned} \quad (3)$$

де  $v_0^*$ ,  $v_0$  – відповідно швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі в ненапруженому стані у відповідних напрямках;  $A_x, A_z, A_{x1}, A_{z1}, A_{y2}, A_{z2}$  – акустопружні коефіцієнти, що визначаються відповідно у нормальній площині  $XZ$  до напрямку прикладання зусилля та під кутом  $\alpha$  до площин  $YX$  та  $YZ$ .

Перше рівняння описує поширення ультразвукової хвилі нормально до площини  $XZ$ , два наступні описують поширення хвилі під однаковими кутами до площин  $YX$  та  $YZ$ , які рівні  $\alpha=45^\circ$ .

Акустопружні коефіцієнти визначаються так:

$$A_i = \frac{1}{k \cdot v_0} \sum_{k=1}^k \left[ \frac{\Delta v_{вим}}{\sigma_{ij}} \right]_k, \quad (4)$$

де  $k$  – кількість кроків навантажень;  $\Delta v_{вим}$  – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в середовищі з прикладеним навантаженням.

Проведено комп'ютерне моделювання навантаження лінійних частин магістральних трубопроводів за типовими схемами та відповідного цим навантаженням розподілу напружень у їх стінці. Встановлено, що в залежності від виду навантаження: внутрішній тиск, зусилля розтягу чи згину, а також їх поєднання відбувається перерозподіл значень окремих компонентів тензору напружень в трьох взаємоперпендикулярних напрямках (рис. 2). Порівнюючи відносні зміни швидкостей поширення поздовжніх ультразвукових коливань в стінках трубопроводів при розглянутих типових схемах навантажень магістральних трубопроводів в трьох взаємоперпендикулярних напрямках, які співпадають з осями симетрії

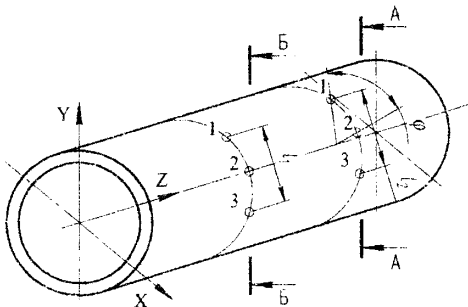


Рис. 1. Вибір точок контролю напружень: 1, 2, 3 – відповідно точки контролю напружень у перерізах  $A-A$  та  $B-B$ ;  $l_1, l_2$  – відрізки контролю;  $\phi$  – кут між двома сусідніми точками контролю в напрямку по околу труби

труби, аналітично отримано множину комбінацій їх значень, як видно з рис. 2. Для визначення місця дії зусилля по околу труби та вздовж неї (рис. 1), а також інтенсивності дії зусилля одного вимірювання є недостатньо. З цією метою збільшено кількість точок контролю по околу труби і по довжині. Розроблено алгоритм визначення місця прикладання зусиль на ремонтній ділянці трубопроводу по околу труби та вздовж неї. В результаті аналізу місць дії зусиль, які є причиною розподілу напружень,

встановлено, що кількість точок контролю по околу труби в межах ділянки

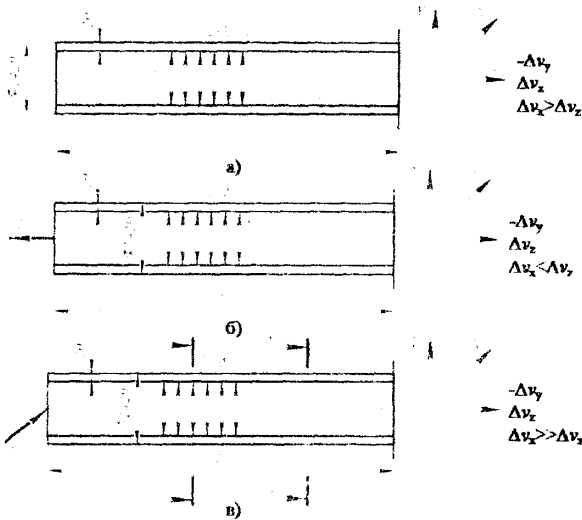


Рис. 2. Зміна швидкостей поширення ультразвукової хвилі при різних схемах навантаження: а) схема навантаження ремонтної ділянки магістрального трубопроводу внутрішнім тиском; б) схема навантаження ремонтної ділянки магістрального трубопроводу внутрішнім тиском та зусиллям розтягу; в) схема навантаження ремонтної ділянки магістрального трубопроводу внутрішнім тиском та зусиллям згину

встановлено, що кількість точок контролю по околу труби в межах ділянки контролю повинно бути не менше трьох. На вибраній ділянці для визначення розподілу напружень за трьома точками апроксимуємо отримані результати параболічним рівнянням:

$$\sigma(x) = ax^2 + bx + c, \quad (5)$$

де  $\sigma(x)$  – функція, що описує розподіл напружень по околу труби;  $x$  – координата по околу труби в діапазоні довжини вибраної ділянки;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти апроксимаційного рівняння.

Як видно з рис. 1, ділянка контролю по околу трубопроводу повинна бути такою, щоб не пропустити зміну характеру дії зовнішнього зусилля, проте її мінімальні розміри повинні задовольняти умові зміни напружень. Ці умови задають оптимальний діапазон величини ділянки контролю в межах від 1/8-ї до 1/4-ї довжини твірної по околу трубопроводу.

Рівняння (5) не може точно екстраполювати величину розподілу напружень за межами ділянки контролю по околу трубопроводу. Екстраполяцію за межами ділянки контролю ефективніше оцінювати за результатами аналізу швидкості зміни напружень на контрольованому відрізку. Це було досягнуто шляхом визначення похідної з апроксимаційного рівняння (5):

$$\frac{d\sigma(x)}{dx} = 2ax + b. \quad (6)$$

У (6) видно, що швидкість зміни напружень визначається коефіцієнтом  $2a$ . Встановлено, що чим більше значення цього коефіцієнту, тим ближче місце концентрації напружень до вибраного відрізка проведення контролю по

околу труби. Точність визначення місця дії максимальних напружень по околу труби залежатиме як від довжини вибраної ділянки контролю, так і від близькості цього місця до неї. З аналізу (6) встановлено три випадки розподілу напружень:

а) якщо  $2a \approx 0$ , то напруження є рівнорозподіленими по околу труби, місця їх концентрації не має;

б) якщо  $2a \gg 0$ , то максимальні напруження знаходяться в напрямку від точки 1 до точки 3;

в) якщо  $2a \ll 0$ , то максимальні напруження знаходяться в напрямку від точки 3 до точки 1.

Для збільшення точності визначення місця максимальних напружень вирішена задача оптимізації, яка полягає в тому щоб знайти мінімальне значення різниці між екстрапольованими напруженнями та дійсними при цьому отримати максимальне значення відношення довжини відрізка контролю  $L_{вим}$  до довжини околу труби  $L_{отр}$ .

Для оцінки віддалі місця дії максимального напруження від відрізка контролю введено коефіцієнт віддалі  $k_a$ :

$$k_a = \frac{L_{вим}}{2aL_{отр}}, \quad a \neq 0. \quad (7)$$

Аналізуючи (7) приходимо до висновку, що при однаковій довжині відрізка контролю із збільшенням швидкості наростання величини напружень,  $k_a$  буде прямувати до мінімального значення.

Використовуючи розроблену математичну модель представлено комп'ютерне моделювання розподілу напружень в стінці магістрального

трубопроводу вздовж його вісі та по околу на ремонтній ділянці (рис. 3). Розрахунок проводився для трубопроводу, діаметром 1420 мм та товщиною стінки 16,5 мм, тиском газу 7 МПа при згинних зовнішніх зусиллях на одному кінці розглянутої ділянки та заземленням другого кінця (рис. 2в). З рис. 3 видно розподіл напружень вздовж вісі трубопроводу між перерізами 1 та 2, які знаходяться на віддалі 20м один від одного, а також зміну напружень по околу трубо-

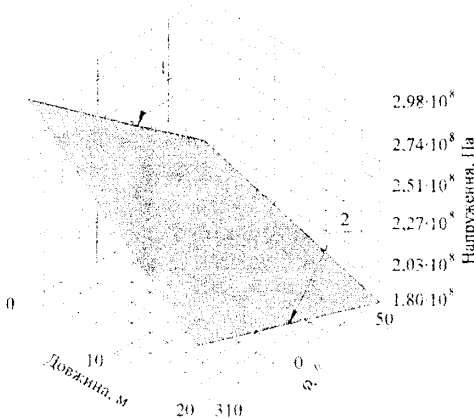


Рис. 3. Розподіл напружень в стінці магістрального трубопроводу вздовж його осі між двома перерізами: 1, 2 – поперечні перерізи трубопроводу

Встановлено, що виявити дійсний розподіл діючих в стінці трубопроводу напружень на

ремонтній ділянці можна провівши відповідні заміри як по околу труби, так і вздовж її вісі у певних перерізах.

В другій частині розділу та в додатках роботи показані напруження, які діють в трьох взаємоперпендикулярних напрямках виражені через зміну швидкості поширення ультразвукових хвиль у металі трубопроводу. На основі проведеного аналізу та четвертої теорії міцності виведено рівняння зміни напружень від зміни швидкості поширення ультразвукових поздовжніх хвиль:

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \left( a \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-xz}} - b \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-yx}} \right)^2 + \left( c \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-yz}} + d \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-xz}} + e \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-xz}} \right)^2 + \left( f \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-yx}} + g \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-yz}} - h \frac{\Delta v_{\text{длм}}}{v_0} \Big|_{\text{-xz}} \right)^2 \right]} \leq \frac{[\sigma]}{n} \quad (8)$$

де  $a, b, c, d, e, f, g, h$  — коефіцієнти, які залежать від акустопружних коефіцієнтів  $A_i$ .

Розроблена математична модель визначення напружено-деформованого стану металу трубопроводу ультразвуковим методом, яка враховує хвильові параметри ультразвукових хвиль. На основі даної моделі вдосконалено ультразвуковий метод контролю, що дозволяє визначати діючі зусилля, давати оцінку їх впливу при проведенні ремонтних робіт, а також можливість знайти місце, напрям дії та вид зусиль для прогнозування їх деструктивного впливу при ремонтних роботах.

**Третій розділ** роботи присвячено удосконаленню ультразвукового пристрою для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань, на який отримано патент на корисну модель. Даний пристрій використовується для вимірювання швидкості поширення ультразвуку в матеріалах при дослідженні їх напружено-деформованого стану. В основу винаходу покладено задачу підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвуку. При вимірюванні часу між зондуючим імпульсом і першим отриманим імпульсом генератор заповнює часовий вимірювальний інтервал імпульсами високої частоти для визначення його тривалості. Імпульс останнього розряду не завжди співпадає з границею часового інтервалу, тому отримується похибка вимірювання. Щоб її зменшити запропоновано розширити часовий інтервал у  $n$  разів шляхом рециркуляції, що дозволить зменшити похибку вимірювання в  $n$  разів.

Удосконалена модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога, що полягає у врахуванні додаткових коливальних контурів та демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини при наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-



частотної характеристики ультразвукового сигналу, підвищити точність визначення його параметрів.

Для зменшення похибки визначення швидкості поширення ультразвукової хвилі проведено дослідження та проаналізовано вплив мікронерівностей на границі розділу поверхні п'єзоперетворювача та досліджуваної поверхні трубопроводу по відношенню до коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль (рис. 4). Встановлено, що ці параметри знаходяться в прямопропорційній залежності один відносно одного, що дає можливість використати отримані результати, як основу для подальших досліджень рівня поверхневих мікронерівностей ультразвуковим методом та за допомогою коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль описувати і оцінювати рівень мікронерівностей на поверхні об'єкта контролю.

визначення швидкості поширення

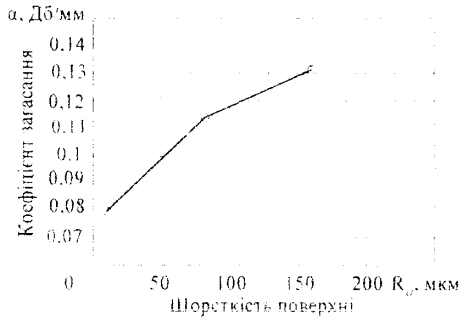


Рис. 4. Залежність коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль від величини поверхневих мікронерівностей

Для генерування та приймання поздовжніх ультразвукових хвиль в трьох взаємноперпендикулярних площинах розроблений ультразвуковий первинний перетворювач, конструкція якого показана на рис. 5.

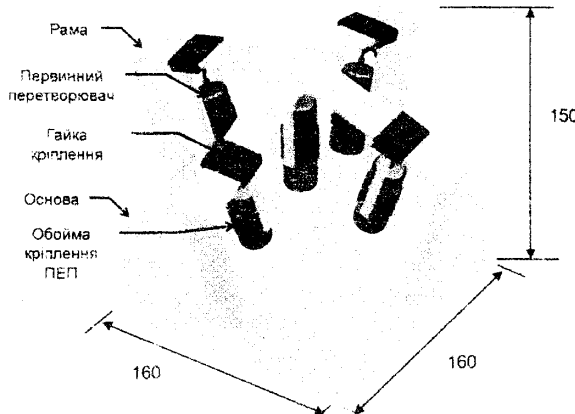


Рис. 5. Конструкція ультразвукового первинного перетворювача

Дана система первинних давачів складається з п'яти п'єзоелектричних перетворювачів, які встановлені в обоймах, що кріпляться до рами під певними кутами. Дві пари п'єзоперетворювачів рухомо встановлені під кутом  $18,7^\circ$  у взаємноперпендикулярних площинах. У кожній парі один п'єзоперетворювач служить випромінювачем, а другий - приймачем ультразвукових коливань. Один п'єзоперетворювач розміщений у центральній частині системи перетворювачів і встановлений перпендикулярно до досліджуваної поверхні. Таким чином, системою

перетворювачів визначається швидкість ультразвукових коливань у трьох напрямках, що в свою чергу дає можливість визначати величину напружень відносно трьох осей.

Проведено аналіз складових загальної похибки розробленого пристрою, за допомогою якого реалізується запропонований метод контролю. Встановлено, що методична похибка становить 4,62 %, інструментальна похибка 0,74 %, сумарна похибка становить 5,36 %.

У четвертому розділі подані результати лабораторних досліджень величини напружено-деформованого стану удосконаленим пристроєм та порівняння отриманих результатів із результатами отриманими теоретичним, тензометричним, ультразвуковим і магнітним методами. Для навантаження зразків при проведенні випробувань на одноосний розтяг використовувалась стандартна випробувальна машина моделі РМ-50 з

допустимим навантаженням 50 т та захватами, які призначені для плоских зразків. Заготовка для виготовлення зразків вирізалась з частини труби, яка орієнтована вздовж її вісі, матеріал – сталь Х60. Для вимірювання величини деформацій в зразках при навантаженні використовувались спеціальні фольгові тензодавачі марки КФ5П1. Магнітним методом напруження визначались за допомогою приладу "КРМ-Ц-К2М", який вимірює величину коерцитивної сили. На рис. 6 та рис. 7 показано лабораторні дослідження явища акустопружності розробленим методом для зразка товщиною 11 мм. Дані експерименти, як

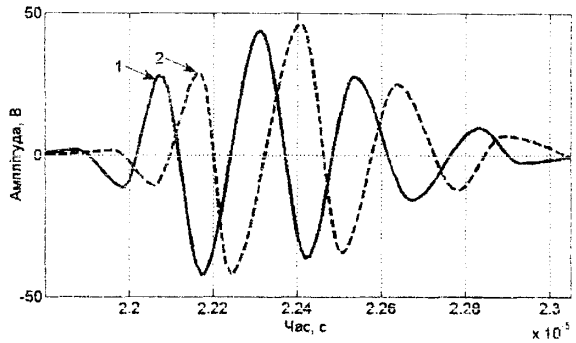


Рис. 6. Зміщення в часі сигналу ультразвукової поздовжньої хвилі від величини напруженодеформованого стану: 1 – напруження в зразку відсутні; 2 – напруження в зразку дорівнюють 376 МПа

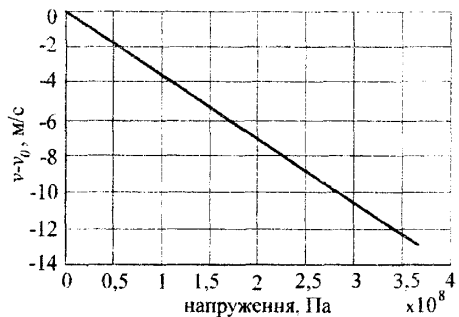


Рис. 7. Зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі від величини напружень:  $v-v_0$  – відповідно швидкість ультразвуку в зразку до та під час збільшення зовнішнього зусилля

видно з рис. 6 та рис. 7 підтвердили висновки про залежність швидкості поширення ультразвуку в металі трубопроводу від його напружено-деформованого стану.

На рис. 8 показано величини напружень визначені різними методами,

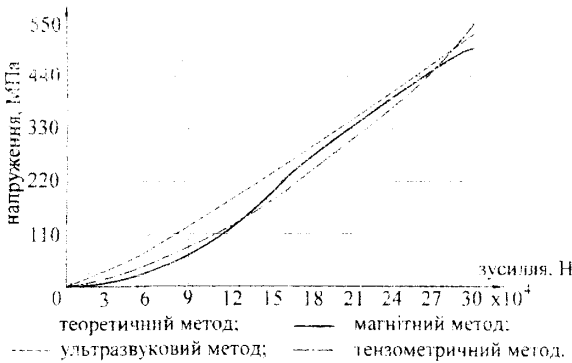


Рис. 8. Залежність величини напружень від прикладеного зусилля, визначених різними методами

шим у порівнянні з тензометричним та магнітним, оскільки величини напружень визначені з допомогою ультразвукового методу для сталі Х60, є ближчі до значень величини напружень визначених теоретичним методом. Показано, що розроблений ультразвуковий метод контролю технічного стану металу є найбільш ефективним.

Результати збігаються із теорією акустопружності та показують перспективність розробленого методу для контролю величини напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

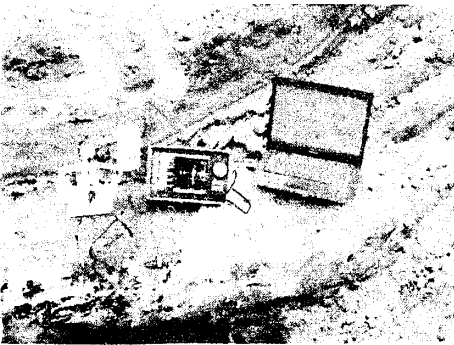


Рис. 9. Контроль напружено-деформованого стану ремонтної ділянки магістрального трубопроводу

які виникають в зразках товщиною 20 мм внаслідок його навантаження. Отримані результати залежності коерцитивної сили від величини напружено-деформованого стану показали значну нелінійність та складність для застосування на практиці. Встановлено, що використання ультразвукового методу визначення напружено-деформованого стану металу трубопроводів є точнішим

**П'ятий розділ** присвячено розробці проекту методики виконання ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістрального трубопроводу та натурним дослідженням напружено-деформованого стану діючого магістрального трубопроводу (рис. 9). В розділі представлено послідовність проведення контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок лінійної частини магістральних трубопроводів, запропонованим методом. Наведено

результати дослідження напружено-деформованого стану ремонтної ділянки на газопроводі «Союз» Ду = 1400 мм Богородчанського ЛВУМГ, Управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз».

Проведений аналіз отриманих результатів контролю, зроблені висновки та дано рекомендації експлуатаційним організаціям.

У додатках наведено проміжні розрахунки, схеми навантаження, які використані для математичного моделювання фізичних процесів у металі труби, копію патенту, характеристики трубопроводів вітчизняного та іноземного виробництва, акт щодо проведення лабораторних випробувань, акт про впровадження результатів досліджень з контролю напружено-деформованого стану магістрального газопроводу «Союз» Богородчанського ЛВУМГ, УМГ «Прикарпаттрансгаз».

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі на основі проведених теоретичних, лабораторних та натурних досліджень розв'язано актуальну науково-практичну задачу, яка дозволяє визначати вид, місце та напрям дії зусилля, яке формує напружено-деформований стан на ремонтній ділянці магістрального трубопроводу, мінімізувати їх вплив, що дає змогу оптимізувати ремонтно-відновлювані роботи.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз методів і засобів контролю напружено-деформованого стану ділянок магістрального трубопроводу, а також розглянуто фактори впливу та навантаження на них під час експлуатації. Встановлено, що використання існуючих методів неруйнівного контролю дає можливість визначати напружено-деформований стан, але не дає можливості визначати місце, вид та напрям дії зусиль, які діють на ділянку трубопроводу та створюють в ній додаткові напруження. Розглянуто засоби контролю напруженого стану трубопроводів в результаті чого виявлені недоліки, серед яких слід відмітити низьку чутливість електромагнітних приладів, зокрема, коерцитиметрів, що не дають змоги точно визначати дійсний напружено-деформований стан трубопроводів, та проводити оптимізацію ремонтних робіт.

2. Розроблена та описана математична модель визначення напружено-деформованого стану магістрального трубопроводу, що дозволяє підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках, яка полягає в тому, що за явищем акустопружності розраховується сумарне напруження в околі однієї точки стінки труби від зміни швидкості трьох ультразвукових хвиль, що поширюються у взаємоперпендикулярних напрямках.

3. Удосконалено ультразвуковий метод контролю напружено-деформованого стану металу трубопроводу, що дало можливість визначати вид, місце та напрям дії зусилля, яке діє на ділянку трубопроводу як по околу

труби так і вздовж її вісі та полягає у визначенні максимального значення еквівалентного напруження за результатами дискретного контролю.

4. Удосконалена модель електромеханічного перетворення енергії коливання чутливого елемента ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача представленого у вигляді електричної схеми-аналога, яка відрізняється від відомих введенням додаткових коливальних контурів і полягає у врахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот, що дало можливість більш точно врахувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів.

5. Удосконалено пристрій для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань, що дало можливість підвищити точність вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань. Розроблена конструкція первинного перетворювача для контролю напружень в стінках магістральних трубопроводів у трьох взаємноперпендикулярних напрямках, яка реалізовує запропонований метод, а також розраховано його параметри.

6. Розроблено проект методики проведення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів.

7. Проведено метрологічний аналіз складових загальної похибки розробленого методу та пристрою контролю та розроблено методику її визначення. Встановлено, що методична похибка становить 4,62 %, інструментальна похибка 0,74 %. Сумарна похибка становить 5,36 %.

8. Проведені лабораторні дослідження запропонованої методики контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів та промислової апробація результатів роботи на газопроводі «Союз» Ду 1400 мм Богородчанського ЛВУМГ, Управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз», результати яких підтвердили їх ефективність.

9. Доказано, що для визначення величини напружень в стінках трубопроводів на ремонтних ділянках найточнішим є ультразвуковий луно-імпульсний метод контролю.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Семенов М. М. Стійкість трубопроводу на ремонтній ділянці / М. М. Семенов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №4(21). – С. 51 – 53.

2. Семенов М. М. Визначення напружено-деформованого стану дугових елементів в просторових системах трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семенов, З. П. Лютак // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2007. - №2(16). – С. 170 - 178.



3. Семеген М. М. Акустичний контроль складних ділянок газопроводу в осесиметричному напруженому стані / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Наукові вісті галицької академії. - 2007. - №1(11). - С. 152-158.

4. Семеген М. М. Визначення величини перемішень в просторових системах дугових ділянок трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Нафтогазова енергетика. - 2008. - №2(7). - С. 38 - 42.

5. Семеген М. М. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. - 2008. - №21. - С. 43-47.

6. Семеген М. М. Дослідження впливу нерівностей поверхні об'єкта контролю на поширення ультразвукових хвиль / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» - 2009. - №14. - С. 20-26.

7. Семеген М. М. Дослідження імпульсного режиму роботи п'єзоелектричного перетворювача / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. - 2009. - №23. - С. 25 - 29.

8. Семеген М. М. Дослідження напружено-деформованого стану газопроводів акустичним методом / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вісник хмельницького національного університету - 2010. - № 2.

9. Пат. 32624. G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / Лютак І. З., Семеген М. М., Померенко А. В., Бедзир А. О. - №u200800077, Заявл. 02.01.2008, Опубл. 26.05.2008, Бюл. №10.

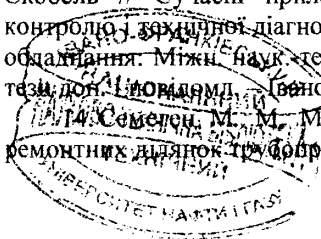
10. Семеген М. М. Контроль напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів через параметри витрати газу / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вимірювання витрати та кількості газу: Всеукр. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 17-20 травня 2005 р.: тези доп. і повідомл. - Івано-Франківськ, 2005. - С. 72.

11. Лютак З. П. Векторне визначення напружень ремонтних ділянок магістральних газопроводів / З. П. Лютак, М. М. Семеген // Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці „ІФНТУНГ-40”: Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 16-20 квіт. 2007р.: тези доп. і повідомл. - Івано-Франківськ, 2007. - С. 179.

12. Семеген М. М. Визначення напружень за напрямком поширення ультразвукових хвиль / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Приладобудування 2007: стан і перспективи: наук.-техн. конф., Київ, 24 - 25 квітня 2007 р.: тези доп. і повідомл. - Київ, 2007. - С. 276-277.

13. Лютак З. П. Метод визначення напружено-деформованого стану трубопроводу на ремонтних ділянках / З. П. Лютак, М. М. Семеген, І. М. Скобель // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання. Міжн. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 2 - 5 грудня 2008 р.: тези доп. і повідомл. - Івано-Франківськ, 2008. - С. 135-137.

14. Семеген М. М. Метод акустичного контролю напруженого стану ремонтних ділянок трубопроводу / М. М. Семеген // Неруйнівний контроль та



технічна діагностика: нац. наук.-техн. конф. і виставка, Київ, 9-12 червня 2009 р.: тези доп. і повідомл. – Київ, 2009. – С. 323 – 326.

### АНОТАЦІЯ

**Семен М. М. Удосконалення ультразвукового контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2010.

Дисертаційна робота присвячена ультразвуковому контролю напружено-деформованого стану ремонтних ділянок магістральних трубопроводів. В роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу, яка полягає у визначенні виду, місця та напрямку дії зусилля, яке діє на дану ділянку трубопроводу, як по околу так і вздовж вісі труби за результатами дискретного контролю. Це дає можливість експлуатаційним організаціям оптимізувати проведення ремонтно-відновлюваних робіт. З цією метою удосконалено метод ультразвукового контролю з використанням поздовжніх ультразвукових хвиль, пристрій контролю та розроблено первинний перетворювач, які реалізують даний метод. Розроблена математична модель визначення напружено-деформованого стану магістрального трубопроводу, що дозволяє підвищити точність обчислення сумарного напруження в його стінках, яка полягає в тому, що за явищем акустопружності розраховується дане напруження в одній точці стінки труби від зміни швидкості трьох ультразвукових хвиль, що поширюються у взаємноперпендикулярних напрямках. Проведено метрологічний аналіз запропонованої методики та пристрою контролю. Результати роботи перевірялись у лабораторних та промислових випробуваннях.

**Ключові слова:** ультразвук, напруження, напружено-деформований стан, зусилля, ремонтна ділянка, трубопровід.

### АННОТАЦИЯ

**Семен М. М. Усовершенствование ультразвукового контроля напряженно-деформированного состояния ремонтных участков магистральных трубопроводов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2010.

Диссертационная работа посвящена ультразвуковому контролю напряженно-деформированного состояния ремонтных участков магистральных трубопроводов. В работе решена актуальная научно-

практическая задача, которая состоит в определении вида, места и направления действия усилия, которое действует на данный участок трубопровода, как по окружности, так и вдоль оси трубы за результатами дискретного контроля. Это даст возможность эксплуатационным организациям оптимизировать проведение ремонтно-восстановительных работ. Разработана и описана математическая модель определения напряженно-деформированного состояния ремонтного участка магистрального трубопровода, что позволяет повысить точность определения суммарного напряжения в его стенках. За явлением акустоупругости рассчитывается данное напряжение в одной точке трубы от изменения скорости трех ультразвуковых волн, что распространяются в взаимоперпендикулярных направлениях. В результате анализа комбинаций изменения скоростей распространения волн в стенке трубопровода в трех направлениях, которые совпадают с осями симметрии трубы данный метод дает возможность характеризовать вид усилий, которые создают напряженно-деформированное состояние на ремонтных участках. В работе описан алгоритм определения мест действия усилий.

Усовершенствован ультразвуковой прибор для определения скорости распространения ультразвуковых колебаний, на основании задачи повышения точности измерения скорости ультразвука. На прибор выдан патент Украины. Разработана конструкция первичного преобразователя для контроля действующих напряжений в стенках трубопровода в трех взаимоперпендикулярных направлениях и рассчитаны его параметры. Усовершенствована модель электромеханического превращения энергии колебания чувствительного элемента ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя, что дало возможность учесть влияние помех.

Для снижения погрешности определения скорости распространения ультразвуковой волны, исследовано и проанализировано влияние микронеровностей на границе раздела поверхности преобразователя и исследуемой поверхности объекта контроля по отношению к коэффициенту затухания ультразвуковых колебаний. Установлено, что эти параметры находятся в прямопропорциональной зависимости один относительно второго. Это дает возможность использовать полученные результаты как основу для дальнейших исследований уровня поверхностных микронеровностей ультразвуковым методом и с помощью коэффициента затухания ультразвуковых колебаний описывать и оценивать уровень микронеровностей на поверхности объекта контроля.

Разработана методика ультразвукового контроля напряженно-деформированного состояния ремонтных участков магистральных трубопроводов. Результаты работы проверялись при лабораторных испытаниях. Промышленная апробация проводилась на газопроводе «Союз» Ду 1400 мм, Богородчанского ЛПУМГ, УМГ «Прикарпаттрансгаз», результаты которого подтвердили эффективность метода.

**Ключевые слова:** ультразвук, напряжения, напряженно-деформированное состояние, усилия, ремонтный участок, трубопровод.

## ANNOTATION

**Semegen M. M. Improvement of ultrasonic testing of the strain state of repair parts pipelines. – Manuscript.**

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science in chief subject 05.11.13 -- Devices and methods for inspection and substance composition detection. -- National Technical Oil and Gas University of Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankivsk, 2010.

The dissertation deals with inspection of the mode of deformation of the repair bays of pipe headers. For this purpose the method of ultrasonic inspection with use of longitudinal ultrasonic waves has been worked out as well as the device and sensor to implement the method. The proposed procedure of inspection of the mode of deformation of the metal side of pipe header in operating conditions without use of the samples from working pipe headers provides an opportunity to define the influence of kind of forces that create the mode of deformation which enables to minimize their influence and will make for the safe carrying out of the optimal repair-and-renewal operations.

A mathematical model for definition of the combined stresses in the metal side of a pipe in the three perpendicular planes has been worked out and described. The method for definition of the speed of ultrasonic wave propagation was further developed that consists in pressure wave generation in planes regardless of their direction.

A metrological analysis of the developed procedure and device has been carried out. The results of work were tested on laboratory and industrial tests.

**Key words:** ultrasound, stress, mode of deformation, force, repair bay, pipe header.